

## 垂直軸型風車の特性試験結果

藤川卓爾\*・谷野忠和\*\*・高森昭憲\*\*\*

## Results of the Characteristics Test of a Perpendicular-Axis Type Wind Turbine

FUJIKAWA Takuji, TANINO Tadakazu, TAKAMORI Akinori

The popularization of both small-sized and large-sized wind turbines is indispensable for the popularization of wind power generation. Though many small-sized wind turbines are manufactured in the world, most of them are not suitable for the special wind conditions in Japan, which are characterized by frequent change of wind direction and heavy turbulence.

This paper describes the results of the characteristics test of a small-sized perpendicular-axis type wind turbine to identify the conditions of a small-sized wind turbine suited to Japanese wind conditions.

## 1. 緒言

風力発電の普及には大型風車だけではなく、小型風車の普及が不可欠である。現在、小型風車のメーカーは世界に数多くあるが、風向の変化が多く、乱れが大きいという日本の特殊な風況に適した小型風車は少ない。日本の風況に適した小型風車の条件を見出すために、小型垂直軸型風車の特性試験を実施したので、その結果を紹介する<sup>1)</sup>。

## 2. 供試風車の仕様

供試風車は定格出力1.5kWの直線翼垂直軸型風車であり、地上約12mの建物（本学シーサイドキャンパス21号館）の屋上に設置した。風車中心高さは屋上より約4mである。

この風車は長菱ハイテック株式会社が「長崎県新事業振興課」より「長崎県中小企業経営革新支援事業費補助金」を受けて実施した「小型風車の開発及び商品化」で開発した小型風車であり、長崎総合科学大学はこの風車の実証試験を受託した。風車の仕様を表1に示す。風車の外形図を図1に、外観写真を図2に示す。

この風車には、東海大学の関和市教授が長年の研究の末に開発された揚力型の高性能翼型 TWT-12213-05-BA00 を使用している。

風車は増速歯車によって三相交流発電機を駆動する。発電機で発生した電力は、発電機制御コンバーター、出力制御インバーターならびに出力フィルターからなる電力変換装置を介して負荷（電気抵抗式温水ヒータ）にて消費される。

\* 工学部機械工学科 教授

\*\* 工学部機械工学科 助教授

\*\*\*長菱ハイテック(株) 取締役設計部長  
2006年3月29日受付

表1 供試風車仕様

項目	単位	要目
形式	—	直線翼垂直軸型
定格出力	kW	1.5 (風速12m/sにて)
定格回転数	rpm	250
発電機定格回転数	rpm	450
回転部分最大直径	mm	2,585
翼長	mm	2,110
翼枚数	—	5
設置場所	—	地上約12mの建物の屋上
風車中心高さ	—	屋上より約4m

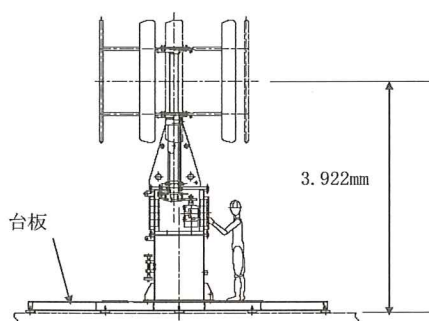


図1 風車外形図

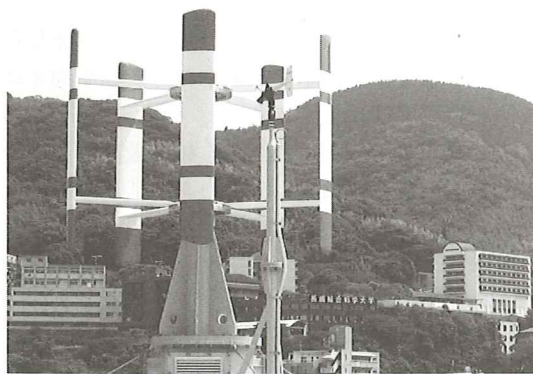


図2 風車外観

### 3. データ計測装置

風車の横（垂直方向は翼の中心高さ、水平方向は翼中心から2.9m）に設置したプロペラ型風向風速計にて計測した風向、風速を始め、風車回転数、

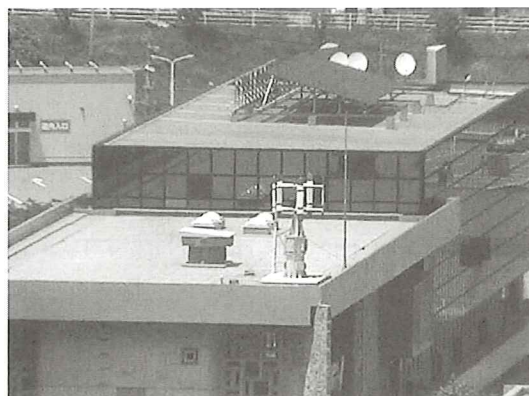


図3 ビデオカメラによる監視状況

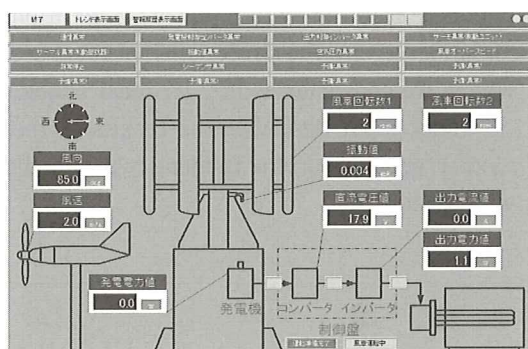


図4 データ計測制御画面

発電機出力、コンバーター・インバーター電圧、インバーター電流、インバーター出力電力を2秒毎に計測し、記録する。

風車の稼働状況は、本学グリーンヒルキャンパスの1号館6階よりビデオカメラにて外観を監視し、上記の風況データ・風車運転データとともに機械工学科の研究室のパソコンにてモニターする。図3にビデオカメラによる監視状況を、図4にデータ計測・制御画面を示す。

### 4. 風車の据付け

#### 4.1 風車設置場所の選定

前述のとおり、風車は本学シーサイドキャンパス21号館の屋上に据付けた。この建物の屋上床は

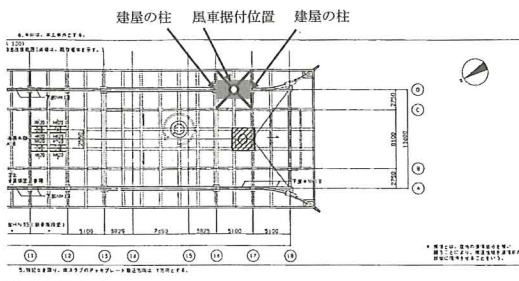


図5 風車据付位置

もともと人間が歩く程度以上の荷重を想定していないので、安全上の万全を期して風車の設置位置を決めた。風車は、図5に示すように、屋上の中心部を避けて屋上の端部に近い建屋の2本の柱の上部に設置した。

#### 4.2 風車の据付け

風車本体は図1に示すように台板上に固定されている。この台板を屋上床の2本の柱と梁の上部に配置した10個の防振ダンパーを介して設置し、図6に示すように4本のスチールロッドで固定した。

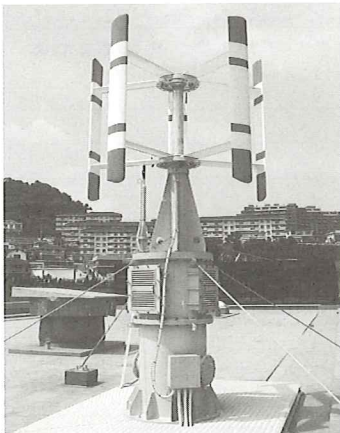


図6 風車据付図

## 5. 実証試験結果

### 5.1 実証試験計画内容

実証試験の内容として下記の4項目を計画した。

- (1) 低風速域に於ける風車発電効率の把握
- (2) 観測時風速と環境影響(騒音)評価
- (3) 強風時(春一番等)のオーバースピード防止策の検証
- (4) 避雷、耐雷性能評価

### 5.2 風況観測結果

#### 5.2.1 最大風速, 平均風速

2005年4月から2006年2月までの風況観測結果を図7に示す。暦日で334日のうち、計測できなかった日が4日あった。

計測した330日中、最大風速は2005年5月18日の21.8m/sであった。年間を通じて最大風速20m/s以上を計測した日はわずかに4日間だけである。最大風速10m/s以上を計測した日は89日間で全体の約27%に過ぎない。

1日の平均風速は、最大で2005年9月6日の5.7m/sである。この日は台風が襲来し、終日風速が高目であった。しかしながら、この日の最大風速は21.4m/sと比較的低かった。年間を通じて、1日の平均風速が2m/s以上と観測された日は62日間で全体の約19%に過ぎない。年間の平均風速は1.69m/sである。これより、残念ながら現在の設置場所は風力発電に適した場所とはいえない。

1日の最大風速と平均風速の相関を取ってみると図8に示すように、大略

$$(\text{平均風速}) \div (\text{最大風速}) / 5$$

の関係にある。

#### 5.2.2 風向・風速分布

①最大風速, 平均風速ともに高目の日, ②最大風速が高目で平均風速が低目の日, ③最大風速が低目で, 平均風速が高目の日, ならびに, ④最大風速, 平均風速ともに低目の日の代表的な日を選定して, その日の風向・風速の分布を求めた結果



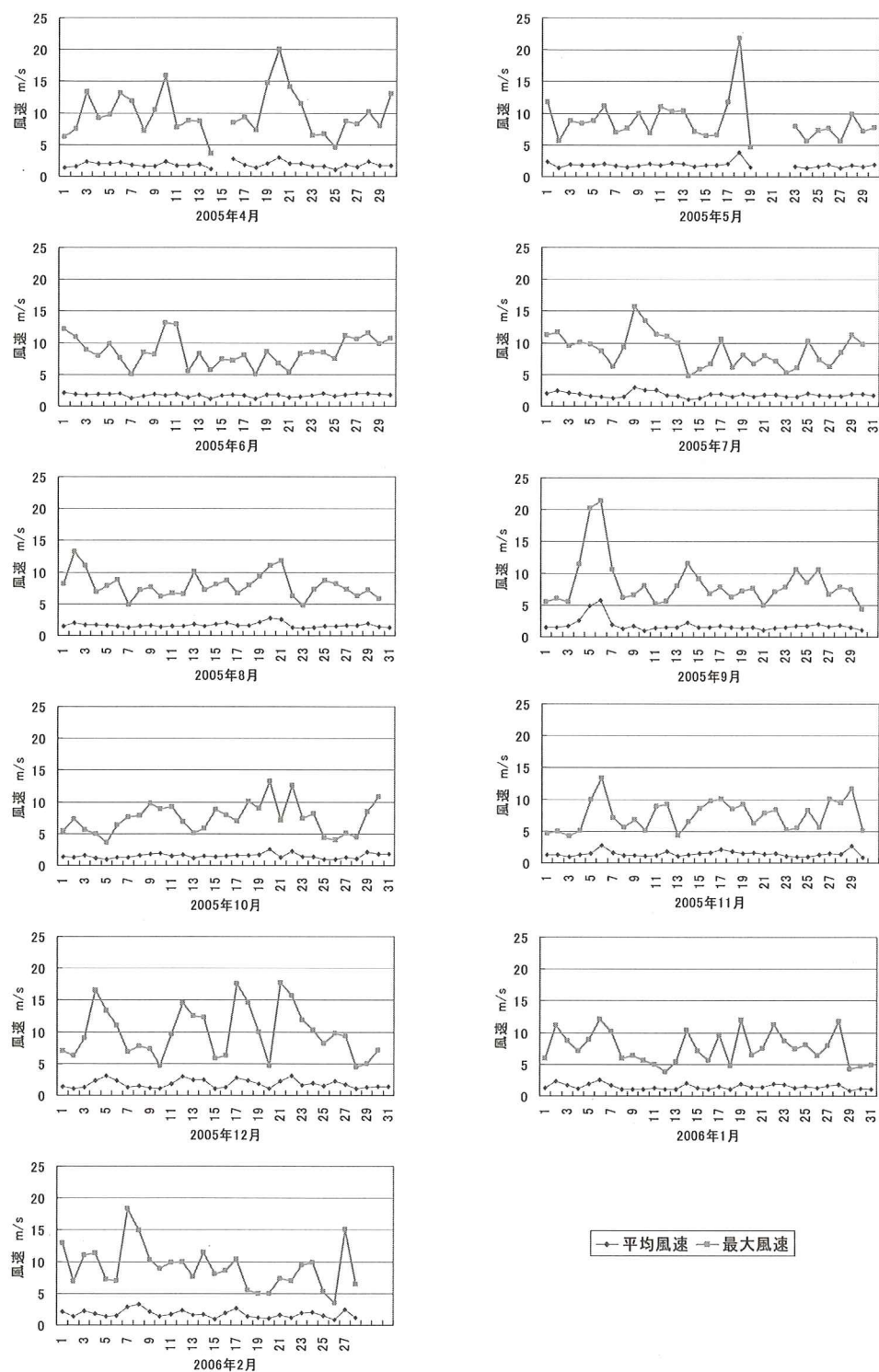


図7 風況観測結果

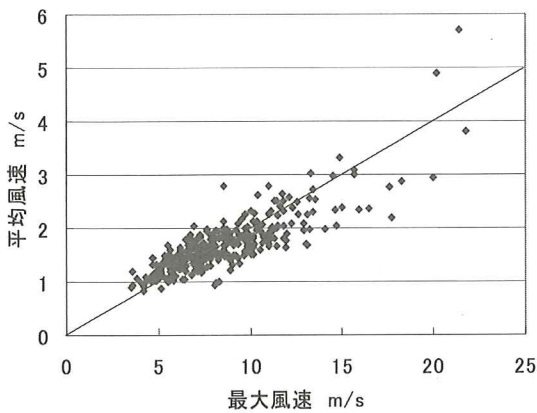


図8 一日の最大風速と平均風速の相関

を図9～図12に示す。

(1) 風速分布

① 最大風速、平均風速ともに高目の日

図9は2005年5月18日の風向・風速分布である。この日の最大風速は21.8m/s, 平均風速は3.81m/sであった。高風速側の風速出現率のカーブがほぼ直線状になっている。

② 最大風速が高目で平均風速が低目の日

図10は2005年4月21日の風向・風速分布である。この日の最大風速は14.1m/s, 平均風速は1.97m/sであった。低風速域の出現率が高く、高風速域の出現率は低い。

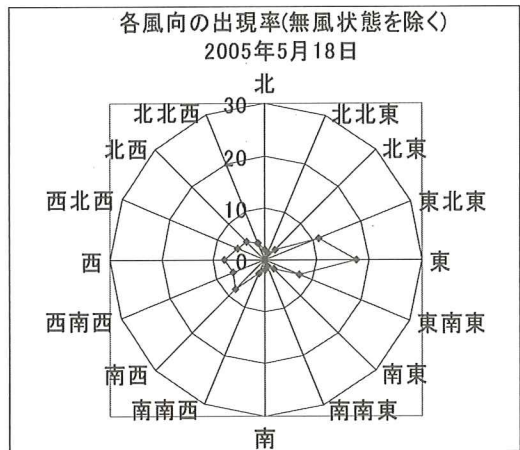
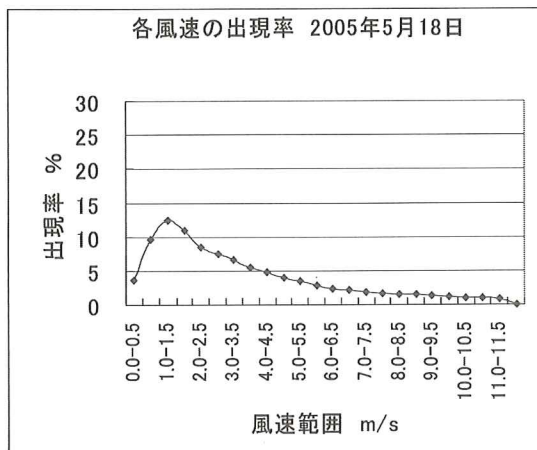


図9 風向・風速分布 (2005年5月18日)

① 最大風速、平均風速ともに高目の日

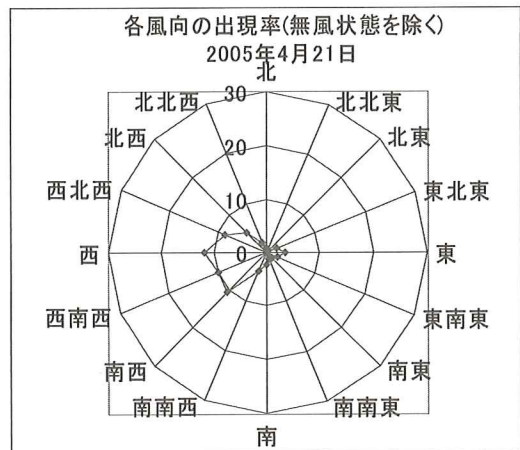
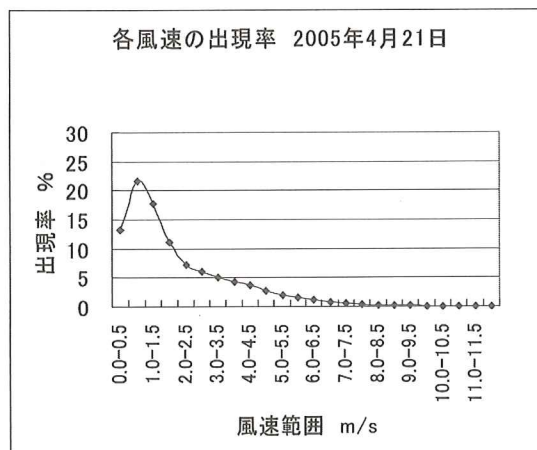


図10 風向・風速分布 (2005年4月21日)

② 最大風速が高目で平均風速が低目の日

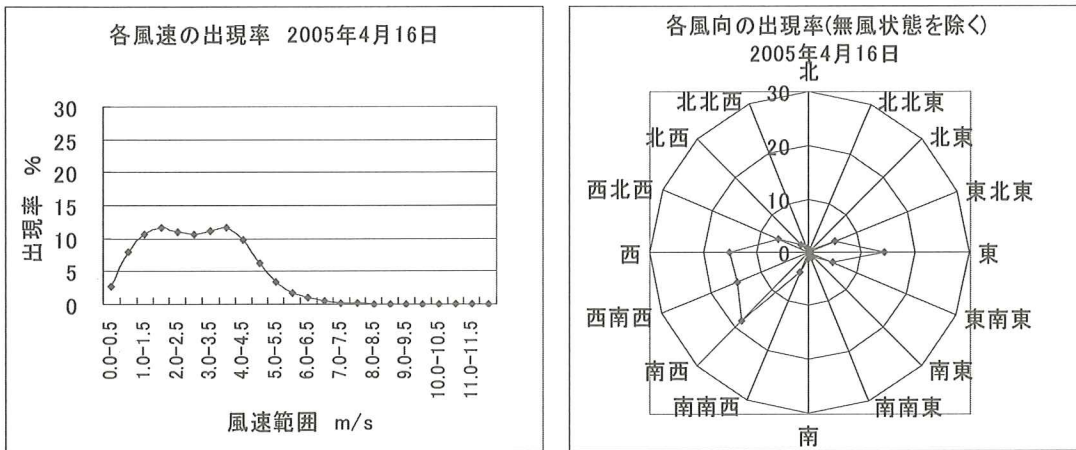


図11 風向・風速分布 (2005年4月16日)

③ 最大風速が低目で平均風速が高目の日

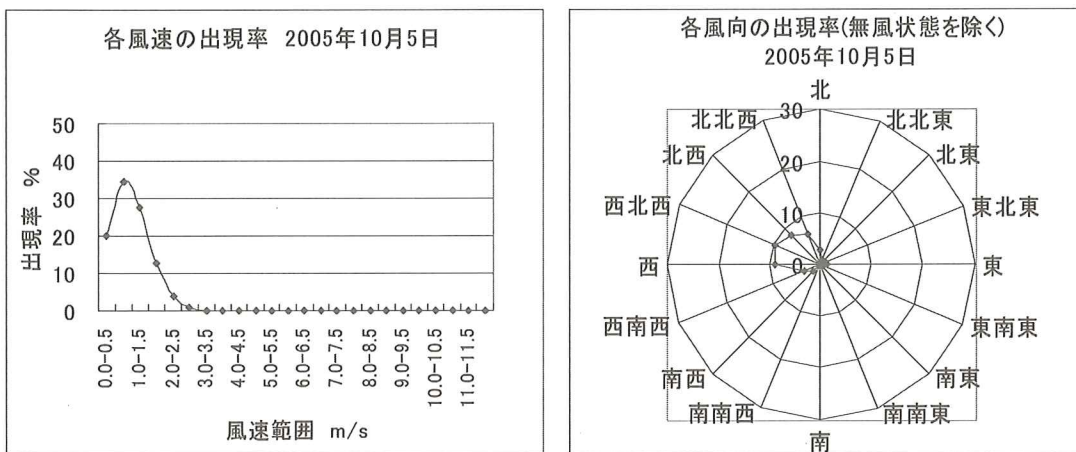


図12 風向・風速分布 (2005年10月5日)

④ 最大風速も平均風速も低目の日

③ 最大風速が低目で、平均風速が高目の日

図11は2005年4月16日の風向・風速分布である。この日の最大風速は8.5m/s, 平均風速は2.79m/sであった。7.5m/s以上の風速域の出現率はほぼ0で、7.5m/s未満の低風速域の出現率が台形状になっている。

④ 最大風速、平均風速ともに低目の日

図12は2005年10月5日の風向・風速分布である。この日の最大風速は3.6m/s, 平均風速は0.94m/sであった。風速範囲

0.5~1.0m/sの極低風速域に出現率のピーク(約35%)があり、3.0m/s以上の風速域では出現率がほぼ0になっている。

(2) 風向分布

上記の①~④のいずれの場合も、主たる風向は東か西が多い。これは、風車設置位置の地形に由来しているものと考えられる。すなわち、図13に示すように、東側に橘湾が開け、西側に日見峠を擁する谷の海への出口に風車が設置されている。



図13 風車設置場所地形

### 5.3 発電状況

供試風車が定格出力で連続運転すれば1日当たり  $1.5\text{kW} \times 24\text{h} = 36\text{kWh}$  の発電量が得られることになる。しかし現実には5.2項に述べたような風況であり、風車が回転昇速するに足るだけの風速が得られる頻度が少ないので、1日の最大発電量は  $0.08\text{kWh}$  である。すなわち、定格発電量の0.2%程度に過ぎない。

一方、補機動力については、供試風車はパネの力でシューを押さえるディスクブレーキ解除用に圧縮空気を使用するため、電動の空気圧縮機を用いているほか、発電機制御盤用に少量の電力を消費する。この電力量は、毎日の記録から見ると1日当たり  $0.01 \sim 0.02\text{kWh}$  程度である。

これより、1日の発電電力量が  $0.02\text{kWh}$  以上であった日数を数えると45日で全体の約14%、 $0.01\text{kWh}$  以上であった日数は253日で全体の約77%となる。330日間の総発電電力量は  $3.44\text{kWh}$ 、補機動力総使用量は  $2.54\text{kWh}$  であり、差引  $+0.9\text{kWh}$  とかろうじてプラスになっている。

### 5.4 風車特性解析基礎式

計測値から風車の特性を解析するための基礎式は次のとおりである。

#### 5.4.1 運動方程式

$$I_p(d\omega/dt) = T_{wt} - T_g - T_f - T_s \quad (1)$$

ここに

$I_p$ : 風車の回転慣性モーメント ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )

$\omega$ : 風車回転角速度 ( $\text{rad/s}$ )

$T_{wt}$ : 風車トルク ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )

$T_g$ : 発電機トルク (発電機出力計測値より) ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )

$T_f$ : 摩擦トルク (摩擦係数を仮定) ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )

$T_s$ : 起動トルク (工場計測値) ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )

#### 5.4.2 各トルクの数式化

$$T_g = P_g / \omega = P_g / (2\pi n / 60) \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (2)$$

$$T_f = k_f \times \omega = k_f \times (2\pi n / 60) \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (3)$$

$$T_s = 314\text{gf} \cdot \text{m} = 314 \times 10^{-3} \text{kgf} \cdot \text{m} \times 9.8\text{N/kgf} = 3.08 \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (4)$$

ここに

$n$ : 風車回転数 (rpm) ……計測値

$P_g$ : 発電機出力 (W) ……計測値

$k_f$ : 摩擦係数 ……仮定値 ( $=0.1$ )

#### 5.4.3 運動方程式書直し

$$I_p(d\omega/dt) = T_{wt} - T_g - T_f - T_s \\ = T_{wt} - P_g / \omega - k_f \times \omega - T_s \quad (5)$$

$$I_p(2\pi/60)(dn/dt) \\ = T_{wt} - P_g / (2\pi n / 60) - k_f \times (2\pi n / 60) - T_s \quad (6)$$

これより

$$T_{wt} = I_p(d\omega/dt) + P_g / \omega + k_f \times \omega + T_s \quad (7)$$

$$T_{wt} = I_p(2\pi/60)(dn/dt) + P_g / (2\pi n / 60) \\ + k_f \times (2\pi n / 60) + T_s \quad (8)$$

$$P_{wt} = T_{wt} \times \omega = T_{wt} \times 2\pi n / 60 \quad (9)$$

ここに

$P_{wt}$ : 風車パワー ( $\text{N} \cdot \text{m/s} = \text{W}$ )

#### 5.4.5 出力と風車回転数の風速による無次元化

##### ① パワー係数:

$$C_p = P_{wt} / \{ (1/2) \rho A V_\infty^3 \} \quad (10)$$

ここに

$\rho$ : 空気密度 ( $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$ )

$A$ : 受風面積 ( $A = 2.585 \times 2.110 = 5.454\text{m}^2$ )

$V_\infty$ : 風速 (計測値:  $\text{m/s}$ )

##### ② トルク係数:

$$C_Q = T_{wt} / \{ (1/2) \rho V_\infty^2 A R \} \quad (11)$$

ここに

$R$ : 風車半径 ( $R = 2.585/2 = 1.2925\text{m}$ )



## ③ 周速比:

$$\lambda = \omega R / V_{\infty} = 2\pi R n / (60 V_{\infty}) \quad (12)$$

## 5.5 計測データの解析

## 5.5.1 2005年12月22日

2005年12月22日の朝は比較的風況に恵まれ、風車回転数が初めて200rpmに到達し、初めて1分間以上連続的に発電機出力が得られた。

図14にこの日の運転記録のうち、風車回転数が200rpmに到達した時刻の前後の、風速、風車回転数、発電機出力を示す。これらの値から5.4項の基礎式を用いて、風車の特性を計算した。

まず、2秒毎に計測された風車回転数から風車の角加速度を求めた結果を図15に示す。図15において、角加速度1はある計測時点とその2秒後の

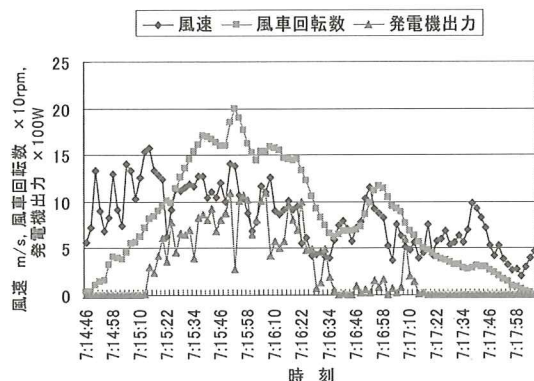


図14 2005年12月22日の運転記録

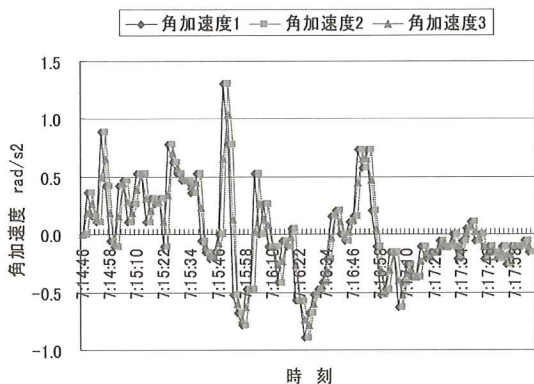


図15 風車の角加速度計算結果

風車回転数から求めたもの、角加速度2は計測時点とその2秒前の風車回転数から求めたもの、角加速度3は角加速度1と角加速度2の平均値である。角加速度3が実際の角加速度に最も近いと考えられる。式(5)に示されるように、このようにして求めた角加速度に風車の回転慣性モーメント ( $I_p = 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ) を乗じたものが風車を加速するトルクとなる。

風車を加速するトルクは、風車トルクからブレーキとなるトルクを減じたものである。ブレーキとなるトルクは、発電機のトルク、摩擦トルク、および起動トルクであり、これらはそれぞれ式(2)～式(4)を用いて求めることができる。

このようにして求めた風車トルクを図16に、風車トルクに風車回転角速度を乗じて求めた風車パワーを図17に示す。

次に、式(10)、式(11)によって、風速の計測値を用いて、風車パワーおよび風車トルクを無次元化し

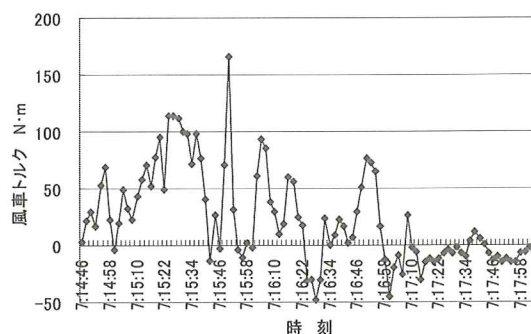


図16 風車トルク計算結果

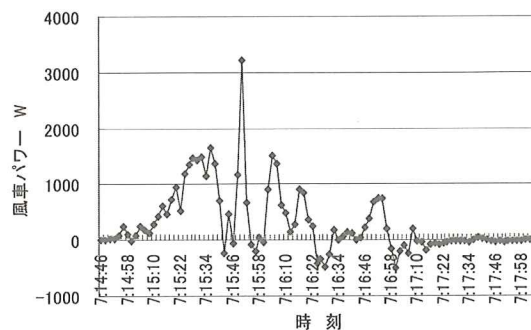


図17 風車パワー計算結果



て、パワー係数およびトルク係数を求めた結果を図18、図19に示す。

図18、図19ではパワー係数、トルク係数とも、所々で極端に大きな値や小さな値になっている。ベッツの法則<sup>2)</sup>により、パワー係数の最大値は約59%であり、理論上これを超えるパワー係数はありえない。パワー係数が極端に大きくなっているところは、風速が一時的に急減したところと一致する。風速が急減すると、風車トルクが急減するために、角加速度が大きくマイナスになるはずである。しかし、2秒間隔の風車回転数計測値からは、この一時的なマイナスの大きな角加速度が算出されないで、風車トルク、風車パワーは実際よりも大きな値が計算される。一方、風のエネルギーや風圧は一時的に急減した風速から計算されるので、パワー係数、トルク係数が過大に算出される。

この点を改良するために、風車回転数が上昇し

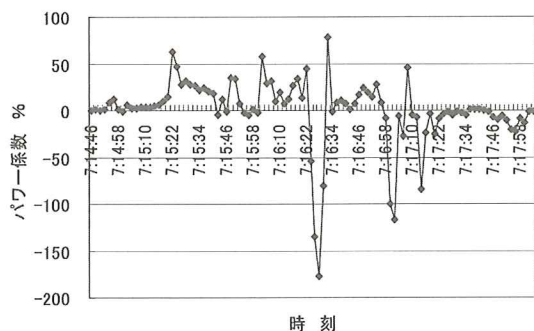


図18 パワー係数計算結果

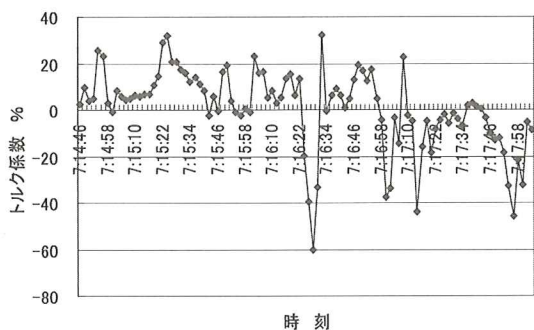


図19 トルク係数計算結果

て、風車が発電を始めた場合には、データ計測間隔を細かくして、0.5秒間隔でデータ計測をするようにした。図20に7時15分10秒～7時16分08秒までの約1分間に0.5秒間隔で計測したデータを示す。これを用いて解析した結果を図21～図23に示す。

図21は角加速度の計算値を示す。2秒毎の計測値から計算した図15に比べると、各時点での角加速度の絶対値が大きくなっている。これは、計測間隔を短くすることによって風車回転数の微妙な変化をより正確に捉えているためと考えられる。

図22はパワー係数計算結果を、図23はトルク係数計算結果を示す。2秒毎の計測値から計算した図18、図19に比べると、所々で極端に大きな値や小さな値になっている場所での係数の値のばらつ

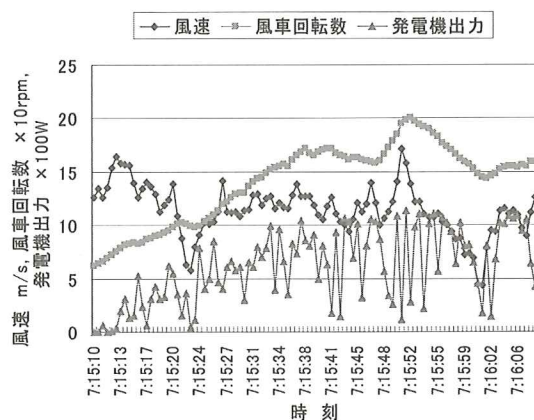


図20 2005年12月22日の運転記録 (計測間隔0.5秒)

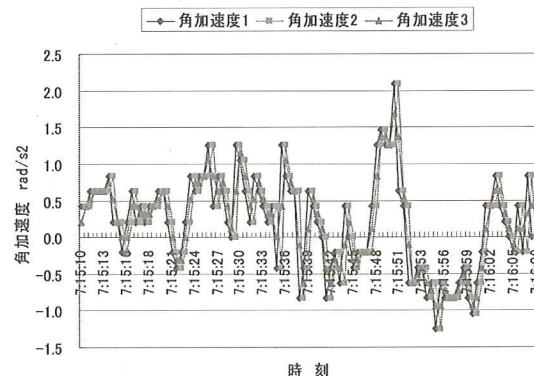


図21 風車の角加速度計算結果 (計測間隔0.5秒)

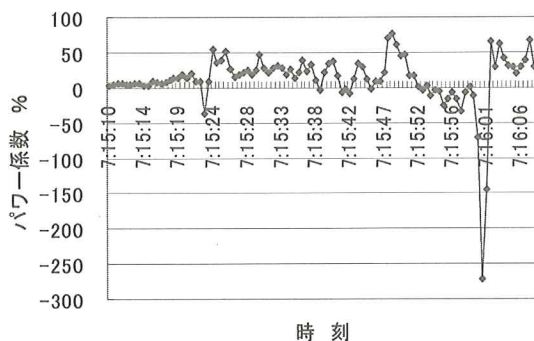


図22 パワー係数計算結果 (計測間隔0.5秒)

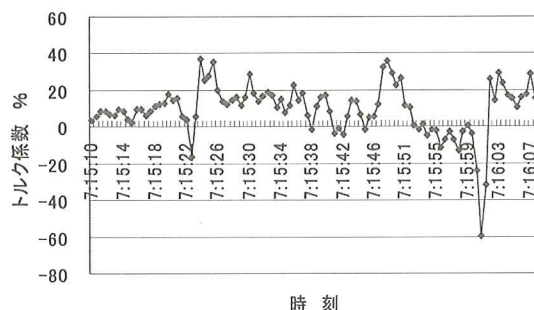


図23 トルク係数計算結果 (計測間隔0.5秒)

きが小さくなっている。ただし、7時15分47秒～52秒の間のパワー係数、トルク係数は図18、図19より大きくなっている。ここは、風速が10m/sから17m/sまで増大を続け、風車回転数が大きな角加速度で上昇を続けており、比較的ばらつきが少ない値が得られているものと思われるが、計算されたパワー係数の絶対値がベッツの法則の約59%を超えているのは説明が付かない。

図24に周速比とパワー係数、トルク係数の関係を示す。パワー係数、トルク係数ともばらつきが大きい、パワー係数がベッツの法則の約59%を超えているものは無視し、かつ、マイナスの値はブレーキが作動したことによるものとして無視すると、両係数ともばらつきの中心の値は計画値に近い。ただし、両係数ともピークになるところが計画値に比べて周速比の小さい方向にずれている。

### 5.5.2 2006年2月7日

2006年2月7日の午後に、風車回転数が初めて

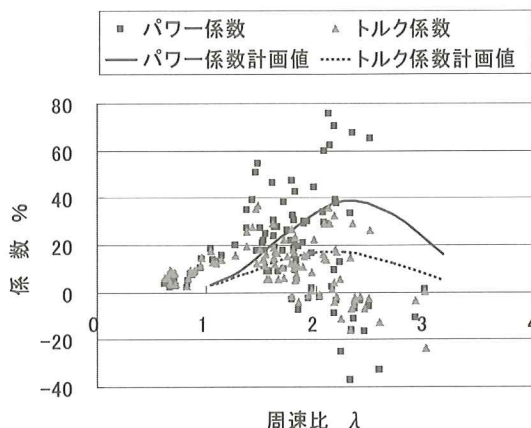


図24 周速比とパワー係数・トルク係数 (計測間隔0.5秒)

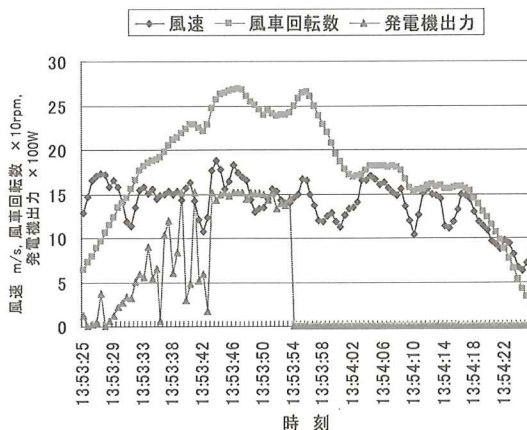


図25 2006年2月7日の運転記録 (計測間隔0.5秒)

定格値の250rpmに到達した。この前後で約12秒間にわたって定格出力1,500W前後の発電機出力が得られた。図25にこの日の運転記録のうち、風車回転数、発電機出力が定格値となった時刻の前後の、風速、風車回転数、発電機出力を示す。13時53分54秒以降、発電機出力が0になっているのは、「発電機制御コンバーター異常」によって発電を停止したためである。これらの値から、前述の2005年12月22日の計測データの解析と同様にして、5.4項の基礎式を用いて、風車の特性を計算した。

まず、風車の角加速度を求めた結果を図26に示す。

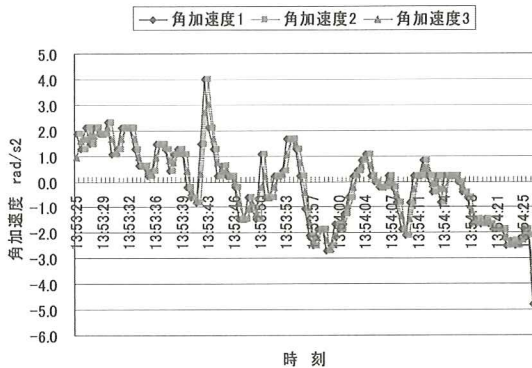


図26 風車の角加速度計算結果 (計測間隔0.5秒)

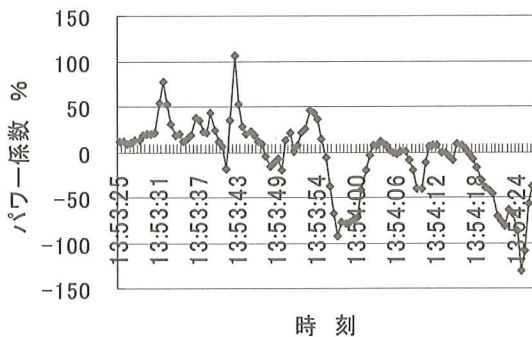


図27 パワー係数計算結果 (計測間隔0.5秒)

次に、パワー係数およびトルク係数を求めた結果を図27および図28に示す。12月22日の場合と同様に、図27および図28でもパワー係数、トルク係数とも、所々で極端に大きな値や小さな値になっている。パワー係数が極端に大きくなっているところは、風速が一時的に急減したところと一致する。

13時53分54秒以降はパワー係数、トルク係数ともマイナスの大きな値あるいは0に近い値になっている。これは、発電機停止にともなってブレーキが作動したためと考えられる。

図29に周速比とパワー係数、トルク係数の関係を示す。パワー係数、トルク係数ともばらつきが大きい、図24の場合と同様にパワー係数がベッツの法則の約59%を超えているものと、マイナスの値になっているものを無視すると、両係数とも

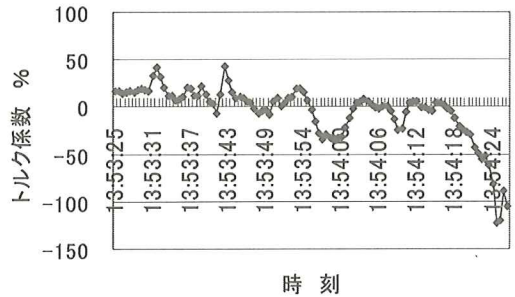


図28 トルク係数計算結果 (計測間隔0.5秒)

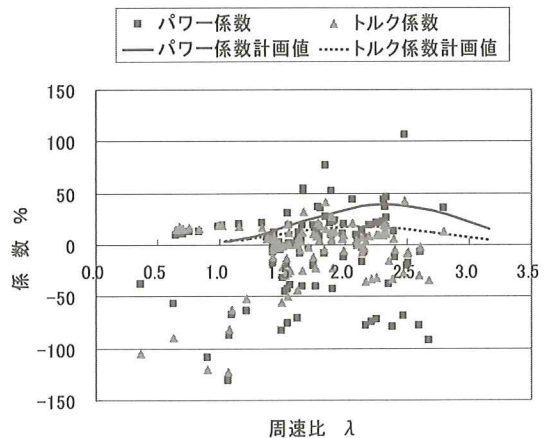


図29 周速比とパワー係数・トルク係数 (計測間隔0.5秒)

ばらつきの中心は計画値に近い。ただし、両係数ともピークになるところが計画値に比べて周速比の小さい方向にずれている。

## 6. 結論

### 6.1 風車の信頼性

定格出力、定格回転数までの範囲において、直線翼垂直軸型風車は振動、騒音等の問題なく、運転できることが確認できた。

最大風速21.8m/sまでに対する耐風信頼性を確認した。

### 6.2 風車の性能

定格回転数、定格出力付近での運転時の計測値



からパワー係数，トルク係数を計算した結果，ばらつきは多いものの計画値に近い結果を得た。

### 6.3 今後の課題

現時点で下記の点が課題である。

- (1) 起動特性の改善
- (2) 21.8m/s 以上の高風速に対する信頼性の確認

### 謝 辞

直線翼垂直軸型風車の特性試験を実施するに当たって，翼を提供して頂き，貴重なご助言を頂いた東海大学の関 和市教授にお礼を申し上げます。本実証試験の実現に当たっては本学大学院の山中孝友客員教授にご尽力を頂きました。風車の製造に当たっては，長菱ハイテック(株)の皆様にお世話になりました。風車の据付に当たっては，本学営繕課の森 一則元課長にお世話になりました。ここに記してお礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 藤川卓爾，谷野忠和，高森昭憲：小型風車の特性試験結果，日本機械学会 第10回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集，(2005—6)，pp.79-80.
- 2) 牛山 泉：風車工学入門，森北出版，(2002—8)，pp.52.